

様式VI

博士学位論文調査報告書

論文題目 Almost Periodic Frequency Arrangement and Its Applications
to Communications (概周期周波数配置とその通信への応用)

申請者氏名 中澤勇夫

最終学歴 昭和 44 年 3 月
大阪府立 大学院 工学研究科 電気工学専攻 修士課程 修了
令和 2 年 3 月
京都大学大学院情報学研究科 数理工学 専攻博士後期課程
研究指導認定見込

学識確認 令和 年 月 日 (論文博士のみ)

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
(調査委員長) 教授 梅野 健

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
教授 山下 信雄

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
教授 守倉 正博

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	中澤勇夫
論文題目	Almost Periodic Frequency Arrangement and Its Applications to Communications (概周期周波数配置とその通信への応用)		
(論文内容の要旨)			
OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重)方式は、現在のデータ容量の増大と、ユーザー数の増加といった時代の要求に適応可能な、現代の基本通信方式として位置付けられるが、そのOFDMの数理的な基礎が、離散フーリエ変換のユニタリー性(複素直交性)に基づいているため、信号の同期条件が崩れる場合、その直交性も同時に崩れることから、非同期型通信にはそのままでは適応することができず、また増幅器の非線形歪みがあるため、キャリア間の高次の信号干渉が必ず生じることにより通信品質が劣化することが知られていた。この様に、データ容量の増大とユーザー数の増加に対応可能で、増幅器の非線形歪みにより通信品質の劣化の程度が低い非同期型の多重通信システムの研究が必要とする背景があった。 本論文では、無理数から構成される周波数を配置することにより、高次のキャリア間の信号干渉を抑える可能性を持つ非同期型多重通信システムである、APFA(Almost Periodic Frequency Arrangement)と言う新しい通信方式を提案し、その提案概要の数学的根拠を与えるとともに、そのAPFA信号の基本特性の評価、APFAシステムの評価、及びAPFAの応用を提案している。 本論文の構成は、全6章から成っている。 第1章は序論であり、APFA導入に到るまでの様々な無線通信システムを概観し、衛星通信の進化、5Gからの進化においてどう言うシステムが今後必要とされているかを述べている。また併せて、APFAの研究の背景となったカオス符号を用いるスペクトル拡散通信、概周期関数の拡散符号を用いるスペクトル拡散通信の研究を述べている。 第2章は、H. Bohr の概周期関数とWeylの一様分布定理を用いて、無理数で与えられる周波数配置が離散的な集合ではなく、ある幅を持って連続に分布する周波数配置される信号の重ね合わせであると言うAPFAを提案し、その概要を説明している。またその周波数配置の無理数性から、当該周波数により周波数分割多重を行った時の、増幅器出力の非線形性の与える影響が抑えられることを数学的な根拠に基づき示し、更に、その周波数配置の分布の幅＝正規化標準偏差を制御パラメーターと捉えることで、OFDMで問題となるPAPR(Peak to Average Power Ratio)を低く抑えるPAPR低減方法を提案して、PAPRを評価している。また、変調波のベクトル誤差であるModulation Error Rateや変復調間の符号誤り率であるBER(Bit Error Rate)と言ったAPFAの基本特性をコンピューターシミュレーションによって評価している。 第3章は、衛星通信用の非同期方式のAPFAの信号伝送上の諸特性を評価している。ここでは、APFAが100万チャネルのサブキャリアと超広帯域通信を可能にすることをコンピューターシミュレーションによって評価している。また、APFA信号の周波数特性が、ホワイトノイズ、$1/f$ノイズ、及び$1/f^2$型のブラウニアンノイズの3つのタイプにまたがることを明らかにしている。 第4章は、まずAPFAのベースバンド信号がどのような信号特性を持つか調べるために、フレームリアプノフ指数(FLE: Frame Lyapunov Exponent)と言う概念を導入し、このFLEが正であることからこのベースバンド信号のフレームが異なれば、信号の位相が大きく異なるという一種のカオス性を明らかにして、更に、カオス符号と組み合わせ、最大600万チャネルのサブキャリア周波数割り当てが可能であることを明らかにしている。 第5章は、APFAの応用として、センサーネットワークに適用可能な小規模APFA, APFAを用いた超広帯域無線通信方式等を提示している。 第6章は、本論文まとめと今後の課題を述べている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、無理数で与えられる周波数を配置する周波数分割多重方式である APFA(Almost Periodic Frequency Arrangement)を新たに提案し、その諸特性を評価し、APFAの特徴を明らかにした。

主な研究成果は以下の通りである。

1. APFAの無理数性に起因するキャリア間干渉の抑圧効果

APFAの周波数配置が互いに非共鳴(周波数が有理数体上一次独立性を持つ)であるという数学的な性質から、非線形性を有する増幅器で周波数多重された信号が増幅されても、キャリア間の干渉が抑圧されることを明らかにしている。

2. APFAのPAPR(Peak to Average Power Ratio)補償技術の提案とその評価

基準周波数からのずれである標準偏差を制御パラメータとし、複素空間ベクトルピーク前後を帯域制限されたパルス信号で逆加算するAPFAのPAPR補償をする方法を提案している。実際、サブキャリア数が256の場合、無補償の場合、PAPRが8.5dBであったものが、約3dB低減でき、PAPRが5.5dBとなることを明らかにしている。

3. APFAのBER(Bit Error Rate:ビット誤り率)の評価

QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)変調と組み合わせることにより、通信路の信号対雑音比 E_b/N_0 が7dBの時、理論値である 10^{-3} と言う実用上耐えうるBERを持つことをコンピューターシミュレーション及び理論計算によって明らかにしている。またこのBERは、周波数の正規化標準偏差が0.013の時に、チャンネル数を1024CHから65536CHに変化しても、一定の安定した特性を有していることを示している。

4. APFAの200万CHの多重通信の可能性評価(素数の冪乗根でAPFAを構成)

コンピューターシミュレーションにより、サブキャリア数が200万程度の多重通信が理論的に可能であることを示した。これは素数の数を1億個用意し、その中の200万個の周波数からなるAPFAの正規化標準偏差が0.1より小さくできることによる。

5. APFAの周波数特性評価

APFAのベースバンド信号の周波数特性が、ホワイトノイズ、 $1/f$ ノイズ、 $1/f^2$ のブラウニアンノイズの3種類であることを明らかにし、OFDMの場合は、 $1/f$ ノイズは含まずに $1/f^2$ のブラウニアンノイズのみとなることからAPFAベースバンド信号特有の周波数特性を明らかにしている。

6. APFAのカオス性評価

新たにFLE(Frame Lyapunov Exponent)と言う概念を導入して、APFAベースバンド信号の特性として、ある種の初期値鋭敏性(カオス性)を有することを明らかにした。

7. Chaos-APFAの提案と600万CHの多重通信の可能性評価

チェビシエフ写像による可解カオスを用いることにより、素数の冪乗根を用いずにAPFAを構成するChaos-APFAを提案し、コンピューターシミュレーションにより、サブキャリア数が600万程度の多重通信が理論的に可能であることを示した。これは、カオス写像の繰り返しを1億回行い、その中の600万個の点から構成される周波数からなるAPFAの正規化標準偏差が0.1より小さくできることによる。

以上のように、本論文は、APFAという新しい通信のコンセプトを提案するとともに、その諸特性を評価し、APFAがいくつかの優れた特性を有することを明らかにしている。APFAにおける周波数配置の情報を如何に受信者側に共有するかなどの実用上克服すべき問題はあるものの、増幅器の非線形性に起因するキャリア間干渉の抑圧効果や、数100万クラスの多重通信の可能性を示す等の通信の現代的な課題の一つの解を与えていて、学術上意義深い結果を与えている。

よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。ま

た、令和2年3月2日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。

要旨公開可能日： 年 月 日以降